팽창재와 수축저감제를 사용한 HPFRCC의 수축 저감 성능

Shrinkage Reduction Performance of HPFRCC Using Expansive and Shrinkage Reducing Admixtures

박 정 준^{1)*} 문 재 흠²⁾ 박 준 형³⁾ 이 장 화⁴⁾ 김 성 욱⁵⁾
Jung-Jun Park Jae-Heum Moon Jun-Hyoung Park Jang-Hwa Lee Sung-Wook Kim

Abstract

High-performance fiber-reinforced cement composite (HPFRCC) shows very high autogenous shrinkage, because it contains a low water-to-binder ratio (W/B) of 0.2 and high fineness admixture without coarse aggregate. Thus, it needs a method to decrease the cracking potential. Accordingly, in this study, to effectively reduce the shrinkage of HPFRCC, a total of five different ratios of SRA (1% and 2%), EA (5% and 7.5%), and a combination of SRA and EA (1% and 7.5%) were considered. According to the test results of ring-test, a combination of SRA and EA (1% and 7.5%) showed best performance regarding restrained shrinkage behavior without significant deterioration of compressive and tensile strengths. This was also verified by performing modified drying shrinkage crack test.

Keywords : Drying shrinkage cracking test, Expansive Admixture (EA), High Performance Fiber reinforced Cementitious Composites (HPFRCC), Ring-Test, Shrinkage, Shrinkage Reducing Agent (SRA)

1. 서 론

콘크리트는 오랫동안 현대사회의 인프라를 구축한 주요 건설재료로서 경제성 및 역학적 성능, 내구성이 우수하여 사회기반시설물에 가장 보편적으로 사용되어온 건설재료이다. 그러나 중량대비 낮은 강도특성을 나타내고, 취성적으로 파괴하는 등 여러 문제점 또한 내포하고 있다.

그러나 최근에는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 물-결합재비 (W/B)를 낮추고, 혼화재료와 강섬유를 혼입하여 강도와 인성을 복합적으로 향상시킨 고성능 시멘트 복합체 (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 HPFRCC)가 개발되었으며, 실용화를 위한 관련 연구가 활발히 진행되고 있다 (Kim et al., 2008; Kamen et al., 2008; Graybeal et al., 2008).

HPFRCC는 물-결합재비 (W/B)가 20%로 상당히 낮고 굵은 골재를 사용하지 않으며, 고분말 혼화재료를 혼입하기 때문에 자기수축이 상당히 크게 발생한다. 특히, HPFRCC와 같이 W/B가 20% 이하인 초고강도 콘크리트의 경우에는 재령 60일에서 약 800 $\mu\text{ε}$ 이상의 자기수축이 발생하고, 만약 외부 거푸집 및 내부 보강근에 의해 구속될 경우 수축균열의 위험성이 상당히 크다 (Yoo et al., 2011). 이러한 수축균열은 구조물의 내구수명 및 구조적 성능을 저하시키기 때문에 HPFRCC를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 수축거동에 대한 정확한 이해 및 균열저감 대책에 관한 연구가 반드시 수행되어야 한다.

콘크리트의 수축을 저감시키는 방법으로는 수축저감제와 CSA계 팽창재를 조합하여 혼입하는 연구가 진행되고 있다 (Maltese et al., 2005). C₄A₃S 클링커를 포함하고 있는 팽창

1) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원, 교신저자
2) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원
3) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구원
4) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 선임연구위원
5) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 선임연구위원

* Corresponding author : jjpark@kict.re.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

재는 초기에 다량의 에트링가이트 (ettringite)를 생성하여 수화반응을 촉진시키고 부피를 팽창시키며, 수축저감제는 시멘트 페이스트의 내부공극수의 표면장력을 감소시켜 수축을 저감시킨다 (Bentz, 2006).

콘크리트의 수축을 측정하고 평가하는 주요목적은 구조물의 수축균열을 억제하여 내구수명을 증가시키기 위함이다. 콘크리트의 수축균열은 수축 발현속도 및 크기, 구속도, 강도발현, 응력의 이완 등에 의해 영향을 받으며 매우 복잡하기 때문에 콘크리트의 강도발현과 크리프 특성 등을 고려할 수 없는 자유수축 실험만을 통해서서는 균열거동의 평가에 한계가 있다 (See et al., 2003; Weiss, 1999).

특히, W/B가 낮은 고강도 콘크리트일수록 충분한 강도발현이 되기 이전, 즉 타설 초기에 자기수축이 크게 나타나고 취성적인 파괴거동을 보이기 때문에 링-테스트 (Ring-test)와 건조수축 균열실험 (KS F 2959) 과 같은 구속수축에 대한 실험연구가 반드시 수행되어야 한다 (Hossain and Weiss, 2004; See et al., 2003; Li et al., 1999).

그러므로 이 연구에서는 HPFRCC의 수축을 효율적으로 저감시킬 수 있는 배합을 찾고 이를 검증하기 위해 수축저감제와 팽창제의 혼입률에 따른 역학적 특성을 평가하였고 구속수축 실험을 통해 수축특성을 평가하였다. 구속수축 실험 중에서 수축을 저감시키는 최적 배합을 도출하기 위해 링-테스트 (Ring-test)를 수행하였고 수정된 건조수축 균열실험을 수행하여 이를 검증하고자 하였다. 한편, HPFRCC의 경우 우수한 인장강도 발현 특성으로 인해 기존의 구속수축 실험 방법로는 수축균열을 유도할 수 없다 (Park et al., 2011; Yoo et al., 2011). 이에 KS F 2959를 토대로 HPFRCC에 적합하게 수정된 건조수축 균열실험을 수행하였다.

2. 실험계획

2.1 재료 및 배합비

본 실험에는 1종 보통 포틀랜드 시멘트 및 입경 0.5mm 이하의 잔골재, 96%의 SiO₂를 포함하고 평균입경이 2μm인 충전재, 노르웨이산 실리카폼 (SF), 일본산 CSA계 팽창재, 독일산 백색 분말의 글리콜계의 수축저감제를 사용하였다. 배합에 사용된 재료들의 화학적 구성성분은 Table 1과 같다.

강섬유의 물리적 특성치는 Table 2에 정리하였다. Table 3은 팽창재와 수축저감제의 혼입여부에 따른 수축실험에 사용된 배합표이다.

Table 1 Chemical properties of materials

Composition % (mass)	Cement ¹⁾	Silica fume (SF)	Expansive admixture (EA)
CaO	61.33	0.38	13.55
Al ₂ O ₃	6.40	0.25	18.66
SiO ₂	21.01	96.00	3.80
Fe ₂ O ₃	3.12	0.12	—
MgO	3.02	0.10	—
SO ₃	2.30	—	51.35
K ₂ O	—	—	0.56
F—CaO	—	—	16.02
Specific surface (cm ² /g)	3,413	200,000	3,117
Density (g/cm ³)	3.15	2.10	2.98

Note, 1) Type I Portland cement

Table 2 Properties of steel fiber

Type of fiber	Density (kg/cm ³)	Tensile strength (MPa)	l_f ¹⁾ (mm)	l_f/d_f ²⁾ (mm/mm)
Straight fiber	7.8	2,500	13	65

Note, 1) l_f : length of fiber, 2) d_f : diameter of fiber

Table 3 Mix proportions of HPFRCC (ratio in weight)

Nomenclature	W/B	Cement	SF	Filler	Sand	Superplasticizer (SP)	Steel fiber	SRA ¹⁾	EA ²⁾
HPF	0.2	1	0.25	0.30	1.10	0.012	$V_f=2\%$	—	—
HPF-S1								0.01	
HPF-S2								0.02	
HPF-E5								—	0.05
HPF-E7.5								—	0.075
HPF-S1E7.5								0.01	0.075

Note, 1) Shrinkage reducing agent, 2) Expansive admixture

2.2 시편제작 및 실험방법

2.2.1 역학적 특성 평가

압축강도 (KS F 2405)는 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 인 원주형 공시체를 변수별로 3개씩 제작하고 최대용량 3,000kN의 UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 측정하였다. 직접 인장강도는 Fig. 1의 Dog-bone 형상을 갖는 시험체로 측정하였으며, 압축강도 실험과 동일하게 재령별로 3개씩 제작하여 실험을 수행하여 평균값을 사용하였다.

2.2.2 링-테스트 (Ring-test)

구속수축 실험은 AASHTO PP34-98에서 제안한 방법과 동일하게 실시하였으며 몰드 및 시편의 상세는 Fig. 2와 같다. 하부 목재판에 테프론 시트를 사용하여 마찰에 의한 콘

크리트 구속을 방지하고, 내·외부 강재 링을 설치한 후에 HPFRCC를 타설하였다.

타설 후 24시간 이후에는 외부 강재 링을 제거하고 알루미늄 부착 테이프를 사용하여 시편의 상·하부의 수분이동을 차단하였다. 구속 변형률 측정을 위해 총 4개의 표면게이지를 내부 강재의 중앙부에 설치하고 데이터로거를 사용하여 변형률을 측정하였다. 이 모든 절차는, 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 인 항온항습실에서 수행하였다.

2.2.3 건조수축균열실험

이 연구에서는 수정된 건조수축균열실험을 수행하였다. 기존 건조수축균열실험에 관한 KS 규정에 의하면 구속되는 콘크리트 시편 중앙의 단면이 $100 \times 100\text{mm}$ 으로 규정되어 있으나, 수정된 건조수축균열실험은 Fig. 3과 같이 양끝단부에

Fig. 1 Test Methods for Direct Tensile Strength Test

Fig. 2 Geometry of Ring-Test

(a) Molds

(b) Test Specimens after Demolding

Fig. 3 Test Procedure of Drying Shrinkage Cracking Test

돌기를 주어 콘크리트를 구속하도록 설계하였고 중앙부 콘크리트의 두께를 기존의 100mm에서 20, 30, 40mm로 감소시켜 구속도를 향상시켜 실험을 수행하였다.

그 외의 실험방법 및 단면의 상세는 KS F 2959의 규정과 동일하게 적용하였다. 실험 수행과정은 우선, 실험 몰드에 HPFRCC를 타설하고 표면이 급격히 마르지 않도록 비닐을 덮어 표면처리를 하였다. HPFRCC 타설 후 1일 이후에는 중앙부위를 감싸고 있는 거푸집을 탈형하고 단면을 모두 노출시킨 상태로 실험을 수행하였다. 콘크리트 수축에 의한 균열 발생 시점은 구속 몰드에 스틸게이지 부착하여 변형률을 측정하고 그 변형률이 급변하는 시점으로 규정하였으며, 상기의 실험은 온도 $23\pm1^{\circ}\text{C}$, 습도 $60\pm5\%$ 인 항온항습실에서 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 역학적 특성

Fig. 4는 수축저감제와 팽창재의 혼입률에 따른 HPFRCC의 압축실험 결과를 나타낸 것으로 팽창재를 혼입한 경우 압축강도는 다소 증가하는 경향을 보였으며, 수축저감제는 압축강도를 감소시키는 경향을 보였다. 팽창재와 수축저감제를 모두 혼입한 HPF-S1E7.5의 경우에는 압축강도가 약 200 MPa으로 나타났다. 수축저감제와 팽창재를 혼입하지 않은 HPF 시편보다는 크게 나타났지만, 팽창재만 혼입한 HPF-E5 및 HPF-E7.5에 비해서는 약간 감소하는 경향을 보였다. 모든 시편에서 설계기준강도 180 MPa보다 큰 값을 나타내었다.

Fig. 5는 수축저감제와 팽창재의 혼입률에 따른 HPFRCC의 인장실험 결과이다. 수축저감제와 팽창재의 혼입함에 따라서 인장강도는 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 수축

Fig. 4 Effect of SRA and EA on the Compressive Strength of HPFRCC

저감제와 팽창재의 혼입으로 인해 섬유와 HPFRCC 매트릭스 (matrix)간의 구속압력 (radial confinement pressure)이 감소하여 섬유의 부착강도가 감소했기 때문으로 판단된다 (Park et al., 2012). 초기 균열 강도 (first crack strength)는 섬유 가교 효과 (fiber bridging effect) 보다는 매트릭스 (matrix)의 강도에 영향을 크게 받는다 (Kang et al., 2010). 실험결과 HPF-E5 시편에서 초기 균열 강도가 가장 작게 나타났으며, 인장강도와 유사하게 수축저감제와 팽창재의 혼입에 따라서 초기 균열 강도가 감소하는 경향을 보였다. 모든 시험체의 인장강도는 설계기준 인장강도 8.8 MPa (KICT, 2012) 이상을 확보하는 것으로 나타났다.

3.2 링-테스트 (Ring-test)

Fig. 6은 수축저감제와 팽창재의 혼입률에 따른 HPFRCC의 링-테스트 실험 결과를 나타낸 것이다. 모든 시험체의 경우 온도변화와 내부 강재 링의 변형이 달라지는 시점을 측정 시점으로 하였다 (Park et al., 2014). Fig. 6에서 수축저감제

Fig. 5 Effect of SRA and EA on the First Crack and Tensile Strengths of HPFRCC

Fig. 6 Average Steel Ring Strains of HPFRCC

와 팽창재를 혼입하지 않은 HPF 시편에서 가장 큰 내부 강재 링의 변형률이 측정되었다. 수축저감제의 혼입률이 증가함에 따라 내부 강재 링의 변형률은 감소하였고, 수축저감제를 각각 1% 및 2% 혼입한 경우 (HPF-S1, HPF-S2), 28일 재령에서 내부 강재의 변형률이 약 15%, 18% 감소하는 것으로 나타났다. 팽창재를 각각 5% 및 7.5% 혼입한 경우 (HPF-E5, HPF-E7.5)의 경우 팽창재의 급격히 응결하는 성질에 의해 최대 팽창률 이후에 내부 강재 링의 변형률이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 타설 후 약 10일 재령 이후부터는 오히려 내부 강재 링의 변형률이 감소하는 경향을 보였다.

이는 10일 재령 이후부터 자유수축 변형률이 미미하였고, 또한 내부 강재 링의 구속압력에 의해 인장 크립 현상이 발생했기 때문으로 판단된다 (Yoo et al., 2013). 따라서, HPF 시편에 비해 28일 재령에서 약 40%, 52%의 내부 강재 링의 변형률이 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 수축저감제와 팽창재를 시멘트 중량에 대해 각각 1%, 7.5% 조합하여 혼입한 HPF-S1E7.5 시편의 경우, 내부 강재 링의 변형률은 가장 작은 값을 나타내 HPFRCC의 수축을 가장 효율적으로 저감시키는 것으로 나타났다. 이는 수축저감제의 혼입으로 팽창재의 급격히 응결하는 성질을 상쇄하고, 수축 발현시점을 지연시켰기 때문으로 판단된다 (Park et al., 2014).

3.3 건조수축 균열실험

이 연구에서는 HPFRCC의 수축을 가장 효율적으로 저감시킬 수 있는 것으로 나타난 수축저감제와 팽창재를 조합하여 혼입한 HPF-S1E7.5에 대하여 건조수축시험을 통해 검증하고자 하였다. 비교를 위하여 수축저감재료를 사용하지 않은 HPF와 비교를 하였다.

Fig. 7은 외부 강재 프레임의 변형률 그래프이다. 외부 강재의 변형률은 스트레인 게이지를 외부 강재 프레임의 양쪽에 두 개를 설치하여 평균값을 사용하였다. HPF와 HPF-S1E7.5 모두 타설 후 약 7일 재령까지는 외부 강재의 변형률이 급격히 증가하다가 그 이후에는 강재의 변형률의 증가량이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 콘크리트의 강도가 타설 이후 약 7일 재령까지는 급격하게 증가하여, 외부 강재를 수축시키는 구속압력은 증가했기 때문으로 판단된다 (Yoo et al., 2013).

팽창재와 수축저감제를 혼입한 DS-HPF-S1E7.5 (DS: Drying shrinkage) 계열의 경우에는 타설 초기에 부피가 팽창함에 의해서 변형률이+방향 (팽창)으로 발생하는 경향을 보였으며, 약 2일 재령이후부터는 수축하는 것으로 나타나 DS-HPF 계열에 비해 최대 변형률이 약 26.5%에서 29.3% 감소하는 경향을 보였다. DS-HPF 계열의 경우, 약 7일 재령이후부터는 외부 강재 프레임의 변형률이 약간 감소하거나 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났으며, 이는 수축균열의 영향으로 판단된다 (Park et al., 2014).

균열관측결과 DS-HPF 계열의 모든 시편에서 타설 후 10일 재령 이전에서 수축균열이 발생한 것으로 확인되었다. 그러나 HPFRCC는 변형률 경화 (strain-hardening) 거동을 보이는 시멘트복합체이기 때문에 외부 강재의 변형률 측정으로는 수축균열 시기를 정확하게 파악할 수는 없었다.

Fig. 8은 건조수축 균열사진이다. 보는바와 같이 HPF의 경우, 모든 시편에서 수축균열이 발생한 것으로 나타났다. 반면에 이 연구에서 링-테스트를 통해 수축저감에 가장 효율적인 HPFRCC의 배합조건으로 제시된 시편인 HPF-S1E7.5에는 수축균열이 발생하지 않았다.

수축저감재료를 사용하지 않은 DS-HPF20의 경우 균열계

Fig. 7 Average Strains of outer steel frame

Fig. 8 Crack patterns of drying shrinkage cracking test specimens

이치를 이용하여 측정한 결과 최대 균열폭은 28일 재령에서 약 0.2mm로 나타났으며, DS-HPF30 및 DS-HPF40의 경우에는 0.2mm, 0.04mm로 나타났다.

앞서 설명한 것과 같이 HPFRCC의 경우 첫 균열 이후에 변형 경화 거동을 보이기 때문에 균열 시점에 대한 정확한 측정이 불가능 하였다. 또한, 전체 부피의 2%에 해당하는 강 섬유를 혼입하였기 때문에 다수의 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 시편의 두께가 가장 큰 DS-HPF40의 경우 최대 균열폭이 0.04mm로 가장 작은 것으로 나타났으며, 이는 단면의 두께가 두꺼워져 균열 저항성이 DS-HPF20와 DS-HPF30의 시편에 비해서 크기 때문으로 판단된다 (Park et al., 2013).

4. 결 론

본 연구에서는 HPFRCC의 수축을 효율적으로 저감시킬 수 있는 배합을 찾기 위해 수축저감제 및 팽창재의 혼입률에 따른 역학적 특성 평가, 구속 수축 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) HPFRCC에 팽창재를 혼입한 경우 압축강도가 증가하였으나 수축저감제 및 팽창재의 혼입에 따른 인장강도는 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 수축저감제와 팽창재의 혼입으로 인해 섬유와 HPFRCC의 매트릭스 (matrix) 간의 구속압력이 감소하여 섬유의 부착강도가 감소했기 때문으로 판단된다. 그러나 강도값의

감소량이 크지 않고, 모든 시험체의 인장강도가 설계 기준 인장강도 8.8 MPa 보다 큰 것으로 나타났기 때문에 HPFRCC에 수축저감제와 팽창재를 사용하여도 구조설계 및 역학적 특성에 대한 부분에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

- (2) 링-테스트 (Ring-test) 실험 결과 수축저감제와 팽창재를 각각 1%, 7.5% 조합하여 혼입한 경우 수축저감제가 팽창재의 급격히 응결하는 성질을 상쇄하고, 수축발현시점을 지연시켜 내부 강재 링의 변형률이 가장 작은 값을 나타내었다. 따라서 이 조건이 HPFRCC의 수축을 가장 효율적으로 저감시킬 수 있는 최적배합으로 나타났다.
- (3) 수정된 건조수축 균열실험을 통해 수축저감에 효율적인 HPFRCC의 최적배합을 검증한 결과, 수축저감재료를 사용하지 않은 HPFRCC 경우 모든 시편에서 수축균열이 발생한 것으로 나타났다. 반면에 팽창재와 수축저감제 각각 1%, 7.5% 혼입한 HPFRCC에는 수축균열이 발생하지 않아 이 배합이 HPFRCC의 수축을 감소시켜 균열저감에 효과가 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단 (과제번호 : 13건설연구SO2 방호·방폭용 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 및 성능평가 기술 개발)의 연구비 지원

에 의해 수행되었습니다.

References

1. Bentz, D. P. (2006), Influence of shrinkage-reducing admixtures on early-age properties of cement pastes, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(3), 423-429.
2. Graybeal, B. A. (2008), Flexural behavior of an ultra high performance concrete I-girder, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 13, 602-610.
3. Hossain, A. B., and Weiss, W. J. (2004), Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens, Cement and Concrete Composites, 26, 531-540.
4. Kamen, A., Denarié, E., Sadouki, H., and Brühwiler, E. (2009), UHPFRC Tensile Creep at Early Age, *Materials and Structures*, 42(1), 113-122.
5. Kang, S. T., and Kim, J. K. (2011), The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC), *Cement and Concrete Research*, 41, 1001-1014.
6. KICT (2012), Development of Ultra High Performance Concrete for Hybrid Stayed Cable Bridge, Report No. KICT 2012-083, Korea Institute of Construction Technology, Korea (in Korean, with English abstract).
7. Kim, S. W., Park, J. J., Kang, S. T., Ryo, G. S., and Koh, K. T. (2008), Development of ultra high performance cementitious composites (UHPCC) in Korea, *Proceedings of the Fourth International IABMAS Conference*, Seoul, Korea, 110.
8. Li, Z., Qi, M., Li, Z., and Ma, B. (1999), Crack width of highperformance concrete due to restrained shrinkage, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 11, 214-223.
9. Maltese, C., Pistolesi, C., Lolli, A., Bravo, A., Cerulli, T., and Salvioni, D. (2005), Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars, *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2244-2251.
10. Park, J. J., Kim, S. W., Ryu, G. S., and Lee, K. M. (2011), The influence of chemical admixtures on the autogenous shrinkage ultra-high performance concrete, *Key Engineering Materials*, 425-453, 725-728.
11. Park, J. J., Yoo, D. Y., Kim, S. W., and Yoon, Y. S. (2013), Drying Shrinkage Cracking Characteristics of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents, *Magazine of Concrete Research*, 65, 248-256.
12. Park, J. J., Yoo, D. Y., Kim, S. W., and Yoon, Y. S. (2014), Benefits of using expansive and shrinkage-reducing agents in UHPC for volume stability, *Magazine of Concrete Research*, 66, 745-750.
13. Park, S. H., Kim, D. J., Koh, K. T., and Ryu, G. S. (2012), Influence of adding shrinkage reducing agent on the interfacial bond strength of steel fibers embedded in UHPC, *Proceeding of the Korea Concrete Institute*, 24(2), 535-536 (in Korean, with English abstract).
14. See, H. T., Attiogbe, E. K., and Miltenberger, M. A. (2003), Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens, *ACI Materials Journal*, 100(3), 239-245.
15. Weiss, W. J. (1999), Prediction of Early-Age Shrinkage Cracking in Concrete, Ph.D. thesis, Northwestern University, Evanston, IL, USA.
16. Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W., and Yoon, Y. S. (2011), Characteristics of Early-Age Restrained Shrinkage and Tensile Creep of Ultra-High Performance Cementitious Composites (UHPCC), *Journal of Korea Concrete Institute*, 23(5), 581-590 (in Korean, with English abstract).
17. Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W., and Yoon, Y. S. (2011), Characteristics of Early-Age Restrained Shrinkage and Tensile Creep of Ultra-High Performance Cementitious Composites (UHPCC), *Journal of Korea Concrete Institute*, 23(5), 581-590 (in Korean).
18. Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W., and Yoon, Y. S. (2013), Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 41, 427-438.

Received : 06/26/2014

Revised : 07/24/2014

Accepted : 08/01/2014

요 지

HPFRCC는 물-결합재비 (W/B)가 20%로 상당히 낮고 굵은 골재를 사용하지 않으며, 고분말 혼화재료를 혼입하기 때문에 자기수축이 상당히 크게 발생하여 구조물 적용 시 균열저감대책이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 HPFRCC의 수축을 효율적으로 저감시키기 위한 방법으로 수축저감제와 팽창제의 사용을 검토하기 위하여 이들의 단독 또는 병행 혼입률에 따른 역학적 특성과 구속 수축특성을 평가하였다. 구속수축 실험 중에서 링-테스트 (Ring-test)를 통하여 HPFRCC에 사용되는 시멘트에 대하여 중량비로 수축저감제 1%와 팽창제를 7.5%를 병행 사용하였을 경우 압축강도와 인장강도가 크게 저하되지 않으면서도 수축을 가장 효율적으로 저감시킬 수 있는 최적 배합임을 도출하였고 수정된 건조수축 균열실험을 통하여 이를 검증하였다.

핵심 용어 : 건조수축균열시험, 팽창제, 고성능 시멘트 복합체, 링-테스트, 수축, 수축저감제